

論文

Squeeze Casting 을 이용한 금속 복합재료 제조공정 개발

김 진* · 이상관* · 홍순형** · 이길근**

Manufacturing Processes of Metal Matrix Composites by Squeeze Casting

Jin Kim*, Sang-Kwan Lee*, Soon-Hyung Hong** and Gil-Geun Lee**

ABSTRACT

Optimum manufacturing process in a vacuum assisted squeeze casting is investigated for continuous SiC and Boron fiber reinforced aluminum matrix composites based on the previous result of single fiber reinforced metal matrix composite(MMC)s. Squeeze casted specimens under different processing conditions are measured their interfacial bonding strengths and tensile strengths to verify the applicability of the obtained process range of single fiber reinforced MMCs. It is found that manufactured 16% volume fraction SiC fiber reinforced aluminum MMCs under the optimum range show two times higher tensile strengths than the aluminum matrix itself and can keep their strengths up to 400°C.

초 록

Squeeze Casting 의 기본방법에 진공장치를 보강한 Vacuum Assisted Squeeze Casting 장치를 설계 제작하여 금속 복합재료의 제조공정 최적화를 시도하였다. 영향을 미치는 제조공정 인자를 가압력, 용해온도, preform 예열온도로 하여 공정인자별로 시편을 제조하여 계면 결합력, 인장강도를 측정하였고, 각 시편의 조직을 SEM 을 이용하여 관찰하였다. 얻어진 결과를 보면 가압력은 Kelvin 식에 의거한 표면장력과 Blake-Kozeny 식에 의거한 channel 에서의 압력구배에 의한 보강섬유 사이의 압력감소의 합을 최소로 할때와, 기지재료 용해온도와 preform 예열온도의 비가 1.6 이하일때가 가장 양호한 상태의 시편제조를 가능케 하였다. 또한, 적절한 제조공정 범위안에서 Squeeze Casting 으로 제조된 약 16% 체적율의 장섬유 SiC/Al 복합재료는 상온에서 기지재료에 비해 인장강도가 200% 정도 높았으며, 400°C까지 강도저하가 없었다.

* 정희원, 한국기계연구소

** 정희원, 한국과학기술대학

1. 서 론

금속 복합재료는 고분자기지 복합재료가 갖는 높은 비강도 및 강성의 일반적인 우월한 기계적 특성 외에 전기 및 열전도성이 우수할 뿐 아니라 고온에서의 우월한 기계적 특성으로 자동차의 내연기관 부품부터 우주, 항공 및 방산제품의 구조재에 이르기까지 많은 응용가능성을 가지고 있어 현재 많은 연구와 개발이 진행되고 있다.

일반적인 금속 복합재료의 제조방법으로는 보강섬유를 얇은 판 사이에 넣어 Diffusion Bonding 시키는 방법, 고액상의 금속기지에서 보강섬유를 장입하여 만드는 Rheocasting, 분말야금법을 이용하여 고체 상태의 보강섬유와 기지 재료분말을 섞어 만드는법, 일정 형태를 이룬 보강섬유 사이에 액상의 기지 재료를 주입하는 방법[1-2] 등이 보편적인데, 어느 방법에서든지 가장 문제가 되고 있는 것은 세라믹 보강섬유와 금속 기지재료의 불량한 젖음성에 의한 불충분한 계면결합력이다[3]. 이러한 세라믹 보강섬유와 금속 기지재료의 젖음성을 증가시키는 방법으로는 일반적으로 Ni 및 Cu에 의한 세라믹 보강섬유의 피막, 반응성이 있는 Mg, Ca, Ti, Zr, P 등의 금속기지에의 첨가, 보강섬유의 열처리, 기지재료의 초음파 교반 등[4]이 제시되어 있다.

Squeeze Casting은 위에서 열거한 보강섬유 사이에 액상의 기지재료를 주입하는 방법중의 하나로, 한 공정으로 주조와 단조를 동시에 행하는 것으로 금속 복합재료 제조시 가압력으로 인한 보강섬유와 기지재료간의 접촉각의 감소, 보강섬유 표면의 기지재료 산화막 형성제거 등으로 계면결합력을 증가시키고 연속적으로 복잡하고 두꺼운 부품을 용이하게 제조할 수 있는 방법으로, 제시된 위의 젖음성 증가 방법을 보강하여 실제적이고 효율적인 금속 복합재료 제조방법으로 많은 관심과 연구가 행해지고 있으며[5-6], 보강섬유가 장섬유인 금속 복합재료 제조에 있어서는 가장 신뢰성 있고 효율적인 방법으로 간주되고 있다[1].

현재까지 Squeeze Casting을 이용하여 금속 복합재료 제조에 관한 연구를 살펴보면 대체적으로 알루미늄을 기지재료로 하고, 세라믹 섬유 및 탄소섬

유를 보강섬유로 하여 시편제조 및 응고과정의 이론적인 추정을 포함하여 시도한 연구들[7-8]과 End-Product 중심으로 시도한 연구들[9-10]을 볼수 있는데, 대부분 보편성 있는 최적 제조공정을 제시하지 못하고 국부적인 제조과정의 언급 및 제조부품의 특성분석에 치우쳐 체계적인 Squeeze Casting 제조과정의 최적화를 이루기 위해서는 더욱 많은 제조공정 관련연구가 요구된다. 이와 같은 배경에는 Squeeze Casting 제조시에 제조공정 인자들은 서로 상호작용하여 한 제조공정 인자의 변화는 다른 인자들에게 심각한 영향을 미치고, 아울러 제조할 금속 복합재료의 보강섬유 종류에 따라서도 요구되는 제조조건이 달라지기 때문에 보편성 있는 최적 제조공정 확립은 실제로 용이치 않다.

본 연구의 목적은 여러 제조방법중의 하나인 Squeeze Casting 제조공정의 체계적인 최적화를 위한 기본자료를 확립하기 위하여 기본적인 Squeeze Casting 구성에 젖음성 증가를 위한 보강섬유 예열장치와 기지재료의 산화성을 제한시키는 진공장치를 보강한 Vacuum Assisted Squeeze Casting 장치를 설계제작하여 Boron 및 SiC 장섬유 보강 알루미늄 금속 복합재료를 공정별로 제조하였다.

제조공정 범위는 축적된 연구결과를 토대로 한 Single Boron 섬유보강 금속 복합재료의 제조공정과 계면결합력 관계 규명으로 얻은 최적 제조공정 Map[11]을 적용하였다. 제조된 시편의 공정별 조직 및 열기계적 성질을 관찰하였고, 이 결과들은 단섬유 Al_2O_3/Al 금속 복합재료의 결과와 비교하였다.

2. 금속 복합재료 제조

2-1. 장섬유 Preform 제조

금속 복합재료는 고분자기지 복합재료와 달리 상품화된 prepreg 가 없으므로 Squeeze Casting에 의하여 금속 복합재료 제조시 preform의 제조는 가장 먼저 대두되는 문제점이다. 여기서는 장섬유 preform 제조방법을 수동으로 한 두가지 방법과 braiding을 이용한 두가지 방법으로 시도하였다.

preform 제조시에 요구되는 점은 용해된 기지재료 주입시 형태를 유지할 수 있게 일정 장력을 갖게

꿈 하는 것과, 보강섬유의 간격을 원하는 체적율에 맞게 일정 간격을 유지하는 것이라고 할수 있다. preform 이 일정 장력을 유지하지 못했을 경우는 보강섬유의 손상 및 파괴가 일어나고[7], 보강 섬유다발 사이의 액상 기지재료 주입시 생기는 압력감소가 증가되고, 유동을 유발시키는 압력구배를 적게 하여 충분한 액상 기지재료의 함침이 일어나지 못하였다.

이 연구에서 시도한 preform 제조방법들은 Fig. 1에 보여 주듯이 네가지 경우이다. 그중 Fig. 1(a)에 보이는 preform 형태는 철사를 이용하여 손으로 감은 경우이고, Fig. 1(b)는 밀판에 원하는 체적율에 맞게 일정 구멍을 뚫고 높이방향으로도 일정하게 홈을 낸 핀들을 이용하여 손으로 일정하게 감은 방법이다. Fig. 1(c)는 2차원 braiding 장치를 이용하여 원통모양으로 짠 preform 이고, Fig. 1(d)는 3차원 braiding 장치를 [12] 이용하여 사각봉 모양으로 제조된 preform 이다.

2-2. Squeeze Casting 에 의한 제조

섬유의 직경이 상대적으로 크고 적은 반경으로 구

부릴 경우, 파단되는 Boron 섬유를 보강하여 금속 복합재료 제조시에는 Fig. 1(a) 방법에 의하여 preform 을 제조하고, 상대적으로 섬유직경이 적어 용이하게 여러 형태로 감을수 있는 SiC 섬유가 보강될때는 Fig. 1(b)와 (c)의 방법에 의하여 preform 을 준비하였다.

제조장치는 Fig. 2에 개략적으로 도시하였듯이 최대 100MPa의 가압용 프레스, 최고 용해가능 온도 1,000°C의 회전 흑연 도가니 용해로, 최고 가열 온도 500°C의 금형과 펀치, 그리고 용탕주입 유도관으로 설계 제작하였다. 이 제조장치는 일반적인 Squeeze Casting 과는 달리 사용되는 기지재료의 산화를 감소시키기 위하여 기계식 진공펌프를 사용하여 진공상태로 제조 가능케 하였다. 실제로 진공이 추가된 Squeeze Casting 장치에서의 제조시편들은 산화물질을 거의 보기가 어려웠고, 불순물 첨가도 거의 없었다. 진공상태의 제조는 추가적으로 모든 가열부품내의 온도분포를 균일하게 유지시키는 효과도 가져왔다.

Squeeze Casting 에서 사용되는 금형의 설계는

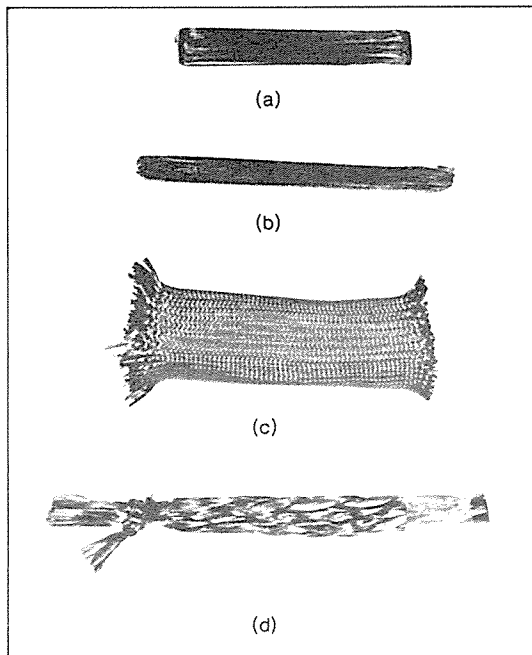


Fig. 1 Continuous fiber preforms
(a), (b) Hand lay-up (b) 2-D braiding
(d) 3-D braiding.

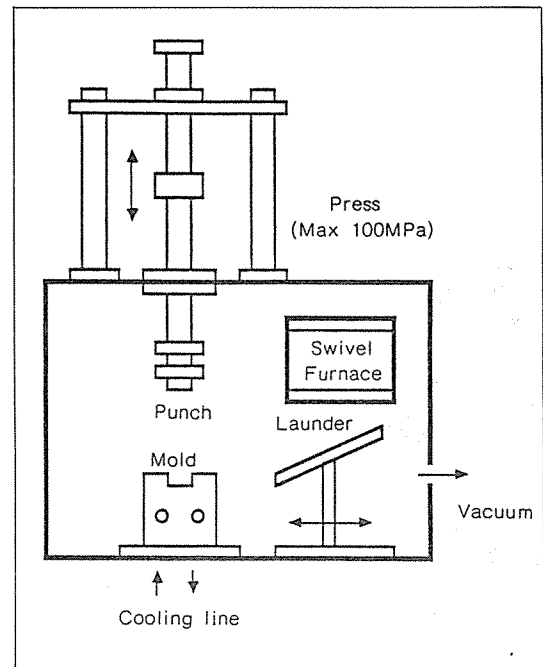


Fig. 2 Schematic drawing of vacuum assisted squeeze casting system.

요구되는 임계 가압력, 제조후의 조직 및 기계적 성질에 많은 영향을 미친다. Al-Si 이원계 합금의 Squeeze Casting 제조에 사용된 금형의 형상에 따른 효과를 보면 두 단계의 가압시 가장 좋은 효과를 얻었으므로[6], 본 연구에서는 직접 가압과 간접 가압의 효과를 보기 위하여 Fig. 3과 같이 두가지 형태의 금형을 사용하였다.

제조순서를 보면 진공하에서 초음파 세척한 알루미늄을 용해하고, preform을 일정 온도로 예열 유지한후 과열용해된 액상의 알루미늄을 주입한 후, 적절한 고액상의 알루미늄이 될때 가압하여 금형내의 냉각수를 이용하여 응고 제조하였다.

2-3. 제조공정 범위

다발상태의 AVCO 사의 Boron 섬유와 Nippon Carbon의 15 μ m 직경의 Nicalon 섬유를 보강하여 99.7% 이상의 순 알루미늄과 Al-13% Si 이원합금 기지재료의 금속 복합재료 제조시의 제조공정은 single 보강섬유 금속 복합재료 제조시에 얻은 최적 공정[11]을 근거로 하여 시도하였다. 이 최적 공정 Map은 온도범위에 있어서 Sessile Drop Method를 이용하여 얻은 알루미늄과 세라믹 섬유 사이의 온도에 따른 최소 접촉각을 근거로 하였으므로 다발상태의 보강섬유인 본 제조시편에서도 그대로 적용하였다. 가압력의 범위는 Kelvin 식을 이용한 표면

장력에 의한 압력감소와 Blake-Kozeny 식에 의한 channel 효과에 의한 압력구배의 합을 최소요구 가압력으로 하였는데, Kelvin 식

$$\Delta p = 2\gamma \sum_i \frac{1}{r_i} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 ΔP 는 압력감소, γ 는 interfacial energy, r_i 는 principal radius of curvature에 있어서 r_i 는 single 보강섬유인 경우는 1차원이고, 다발상태 경우는 보강섬유 직각방향의 단면은 2차원 경우라 그 차이가 위의 식(1)에서 보면[7] 약 40% 정도되고, 전체적인 압력감소 측면에서 더 요구되는 가압력은 직선적인 관계를 가지지 않으므로 2차원 경우의 다발 보강섬유 시편 제조시에는 최적 공정 Map의 최소 가압력보다 10% 정도 높여서 시도하였다.

2-4. 제조시편

최적 제조공정 Map을 근거로 하여 각각 다른 preform 형태, 금형, 제조공정 인자들—가압력, 용해온도, 예열온도, 지연시간—에 따른 결과를 살펴보면, 우선 preform 상태가 양호하지 않을 경우 즉 보강섬유에 충분한 장력이 유지되지 못할 경우는 거의 액상의 기지재료 함침이 이루어지지 않았다.

Fig. 1(a)와 같은 경우에는 시편의 크기도 적고 보강섬유 체적율도 크지 않아 심각하지는 않았으나 Fig. 1(b)와 같은 preform에 있어서는 뚜렷하게 장력의 효과를 볼수 있었다. 가압력에 의한 효과는 B/A1 제조에 있어서 최적 제조공정 Map의 최소압력 40MPa와 최대압력 75MPa 경우에 있어서 두조건 모두 기지재료와 보강섬유 사이의 함침을 충분히 유발시켰으나 Fig. 4에서 보듯이 75MPa 경우는 보강섬유 표면을 파괴시켜 전체적인 복합재료 물성치 저하를 가져왔다.

그러나 SiC/Al 제조에 있어서는 Boron 섬유의 직경이 100 μ m인데 비해 SiC 섬유의 직경은 15 μ m으로 보강섬유 전체의 표면적이 증가되어 표면장력 및 channel 효과에 의한 압력감소는 증대되어 40

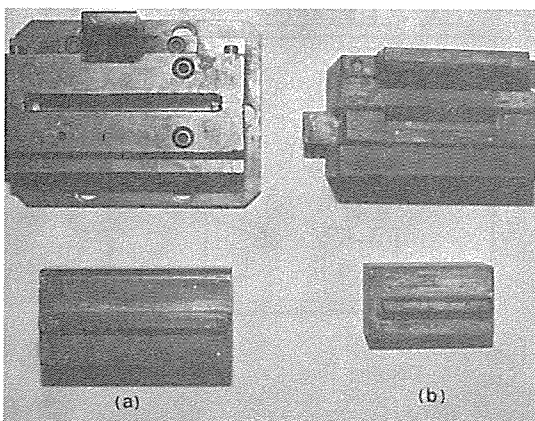
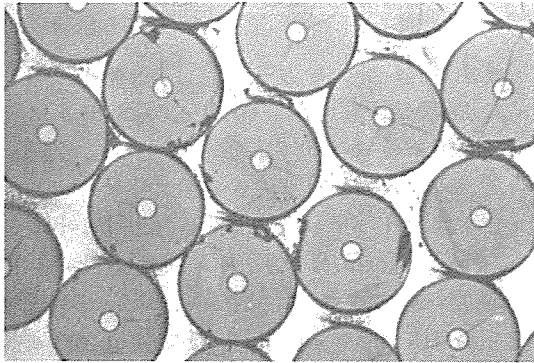
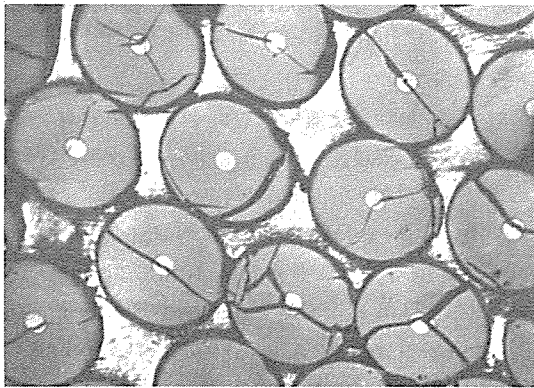


Fig. 3 Two types of mold (a) indirect pressurizing (b) direct pressurizing.



(a) (X 200)



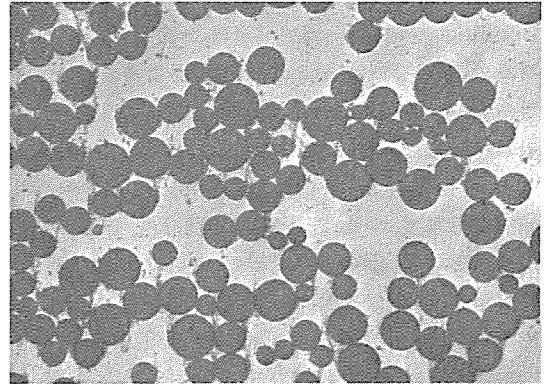
(b) (X 200)

Fig. 4 B/Al-13% Si composites manufactured under the applied pressure of (a) 40 MPa (b) 75 MPa.

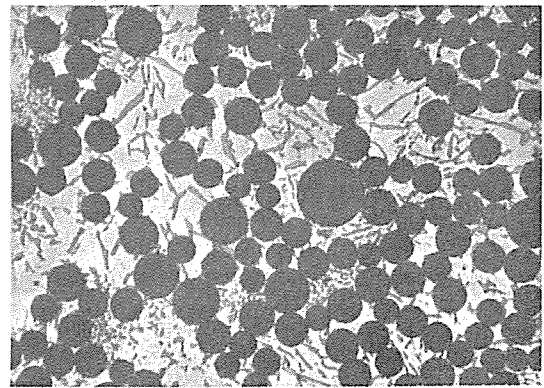
MPa의 압력으로는 충분한 기지재료 함침이 일어나지 않았고, Fig. 5에 보여주듯이 75MPa 경우 순 알루미늄 기지와 Al-13% Si 기지재료 모두 양호한 시편제조를 가능케 하였다.

기지재료의 용해온도는 산화의 영향과 제조시간의 단축을 위하여 800°C로 고정을 하고, preform에 열온도의 영향을 B/Al-13% Si를 가지고 살펴 보았다. 가능한 낮은 열온도에서 제조 가능성을 보기 위하여 최적 제조공정 Map의 온도보다 100°C 낮추어 시도하였다. 40MPa에서 300°C, 400°C, 500°C 모두 함침은 되었으나 계면의 상태는 열온도가 낮을수록 불량하여졌다[8].

사용된 금형의 영향은 이 실험에 있어서 가압력의



(a) (X 400)



(b) (X 400)

Fig. 5 Squeeze casted (a) SiC/Al (b) SiC/Al-13% Si.

효과를 뚜렷이 인지할 수는 없었는데, 시편의 크기가 너무 적고 간접 가압용 금형에서는 punch와 금형 사이의 틈이 너무 작은 까닭으로 추정된다. 아울러, 간접 금형에 쓰인 분리형 금형은 제조시편의 분리가 용이하고 재사용 준비시간이 짧으며, 75MPa의 압력이 작용하여도 나사고정으로 충분히 기밀을 유지하였다.

3. Squeeze Casting 제조 금속 복합재료의 특성

3-1. 계면결합력

금속 복합재료에서 계면의 상태는 복합재료의 기

계적 성질에 결정적인 역할을 한다. 계면이 Perfect Bonding 상태라면 계면에서의 전단강도는 기지재료의 전단강도와 같으므로[13] 복합재료화 된 물 성치는 혼합률(Rule of Mixture)과 잘 일치하며, 파괴거동시 계면에서의 에너지 감소로 파괴인성치를 높이는 결과를 가져온다. 그러나, 본 연구에서의 계면결합력에 대한 관점은 계면에서의 결합상태는 공정조건과 밀접하게 관련되어 있다고 가정하여 인장실험을 통한 공정별 제조시편의 기계적 성질을 규명하기 전에 인장강도 크기에 결정적인 역할을 하는 계면결합력의 공정별 변화를 관찰하였다.

Fig. 6은 B/Al-13% Si 제조시 40MPa의 가압력에 800°C의 기지재료 용해온도시에 preform 예열온도에 따른 계면결합력 —계면 전단강도—을 Indentation 방법[8]으로 측정한 결과이다. 여기서 500°C의 예열온도시 가장 큰 계면결합력을 나타내었는데, 이것은 제조시편의 공정별 계면조직 관찰에서 보여준 500°C에서의 가장 양호한 계면상태 결과에 잘 일치하고 있다.

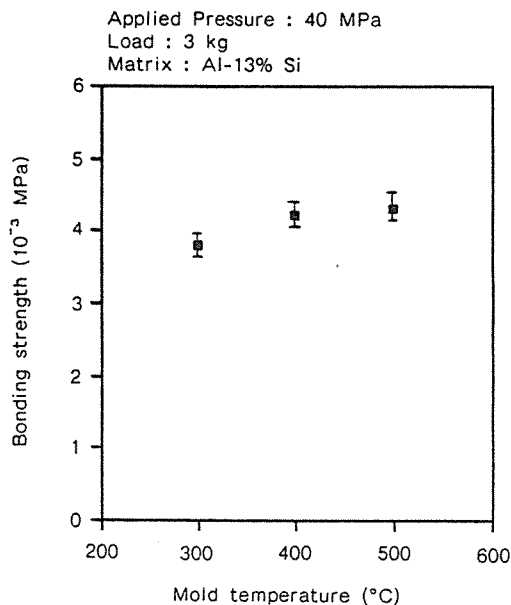


Fig. 6 The effect of the mold temperature on the interfacial bonding strength.

3-2. 열기계적 성질

계면조직의 관찰과 계면결합력 측정결과는 최적 제조공정 Map을 다발의 B/Al-13% Si 금속 복합재료의 제조에 충분히 응용할 수 있는 가능성을 보여 주었다. 그러나, 실제 응용을 위하여 제조된 복합재료의 기계적 성질인 인장강도를 계면결합력 측정과 같이 preform 예열온도에 따라서 관찰하였다. Fig. 7은 예열온도에 따른 B/Al-13% Si의 인장강도 변화인데 가압력 40MPa일 경우 Fig. 6의 계면결합력의 변화와 일치하는 것을 볼수 있다. 즉, 500°C의 예열온도는 가장 높은 인장강도 값을 주었다. 그러나, 가압력 75MPa일 경우 500°C의 예열온도 결과는 300°C 보다도 떨어졌는데 이것은 예열온도의 영향보다는 가압력 75MPa시 Boron 섬유 표면이 손상되어 기계적 성질의 저하를 가져와 생긴 결과로 볼수 있다.

계면결합력과 인장강도간의 관계를 살펴보면 먼저 Fig. 6에 나타난 길이 5cm 시편의 계면강도는 기지재료의 전단강도에 비하여 10%도 되지 않으므로, 일차적으로 제조시편은 Perfect Bonding 상태의 계면은 아님을 알수 있다. Perfect Bonding이 아닌 계면에서는 Fig. 8에서 도시하듯이 계면에서 미끄럼이 일어날 수 있는데, 복합재료에 인장력을 가할때 기지재료와 보강섬유의 Poisson Ratio 차에 의한 횡방향의 압력을 고려한 Hearle[14]의 유도식을 적용하고, 계면강도를 임의의 미끄럼 상수 μ 를 도입하여

$$\tau_0 = \mu P_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 τ_0 : 계면강도, P_0 : 횡방향 압력

로 표시하면, 보강섬유에 걸리는 응력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_r = \sigma_m \frac{C_1}{C_2} \left[1 - \exp\left(-2\mu C_2 \frac{x}{r_0}\right) \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_1 = \frac{1}{\left[1 + \frac{2+a}{av_m} + b \frac{1-v_f}{v_m} \right]} \quad a = \frac{v_m}{v_f}$$

$$C_2 = \frac{1+ab/c}{a \left[1 + \frac{2+a}{av_m} + b \frac{1-v_f}{v_m} \right]} \quad b = \frac{E_m}{E_f} \quad c = \frac{\nu_m}{\nu_f}$$

여기서 r_o 는 보강섬유 반경, σ_m 은 기지재료에 걸리는 응력, x 는 보강섬유 끝단에서 임의까지의 거리, v 는 체적율, 그리고 ν 는 포와송비이다.

식 (3)을 체적율 20%의 SiC/Al 에 적용하여 미끄럼 상수 μ 와 무차원의 보강섬유 응력 $C_2/C_1 \cdot \sigma_f/\sigma_m$ 의 관계로 나타내면 Fig. 9와 같다.

여기서 복합재료 끝단에서 10 r_o , 20 r_o 는 지점에서의 보강섬유에 걸리는 응력은 달라지는데, 이 값들을 보강섬유 전체에 걸쳐 적분하여 평균낸 값과 복합재료의 인장강도와를 비교해 보면 미끄럼 상수 μ 가 0.1 정도일때의 값과 거의 일치하는데, 여기서의 가정은 기지재료는 비록 계면에서 미끄럼이 있어도 복합재료내에서 전단변형으로 보강섬유와 보강섬유 사이에 하중을 전달만 해주는 역할을 하는 것으로 보았다.

그러면 여기서 얻은 μ 와 횡방향에 걸리는 압력 P_o 를 다음 식

$$P_o = C_1 \sigma_m - C_2 \sigma_f \dots\dots\dots (4)$$

에서 얻은 식 (2)에 대입하여 얻은 값 τ_o 를 Fig. 6에 나타낸 계면결합력과 비교하면 식 (2)의 가정의 신뢰성을 알수 있다.

75MPa의 가압력으로 만들어진 장섬유 SiC/Al

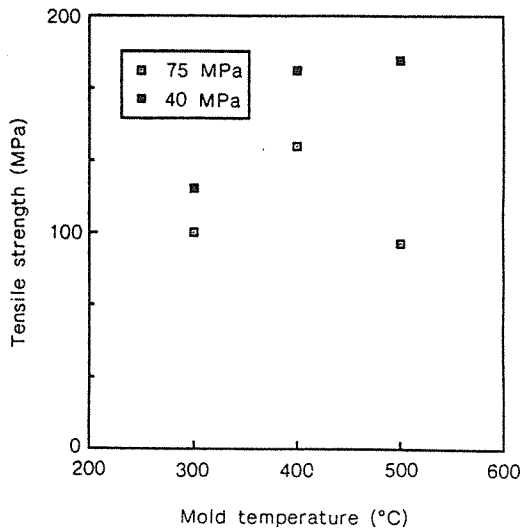


Fig. 7 The effect of the mold temperature on the tensile strength.

의 상온 및 고온에서의 인장강도는 Fig. 10에서와 같이 상온에서 44kg/mm²이며, 보강섬유 체적율 16%일때 혼합율(R.O.M.) 계산과 비교해 보면 이론치의 95% 정도이다. 또 이 값은 350°C까지 거의 일정하게 유지되었다. 아울러 단섬유 형태의 체적율 20% Al₂O₃/Al 복합재료(일본 경금속 제품)와 비교하여 보았는데, 이 제조시편은 상온에서 알루미늄 기지재료에 비해 10% 정도의 인장강도 증가를 보였으며, 고온에서의 강도 유지는 300°C에서 급격한 저하를 보여주었다.

4. 결 론

Vacuum Assisted Squeeze Casting 장치를 설계 제작하여 Single 보강섬유 금속 복합재료를 각 공정조건별로 제조하여 계면결합력을 측정하여 얻은 최적 제조공정 Map을 근거로 하여 다발의 Boron 및 SiC 섬유를 보강섬유로 하고, 순 알루미늄과 Al-13% Si 이원합금을 기지재료로 하여 제한된 공정조건하에서 시편을 제조하였다. 제조된 시편의 계면조직과 계면결합력을 공정별로 관찰하여 최적 제조공정 범위를 확인하였다.

제조된 SiC/Al 복합재료는 상온과 고온에서 인장강도를 측정하였다. 이 결과를 아울러 단섬유 Al₂

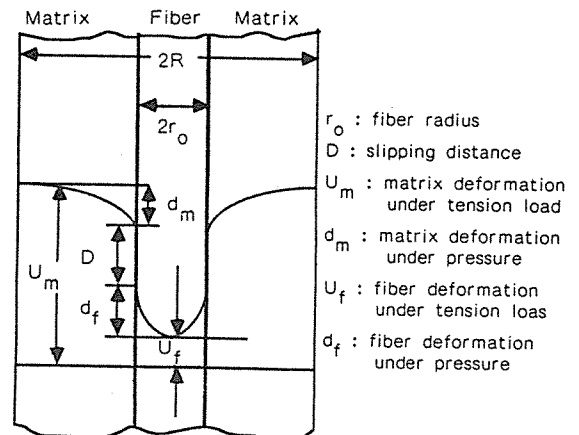


Fig. 8 Fiber deformation under the pressure as the interface.

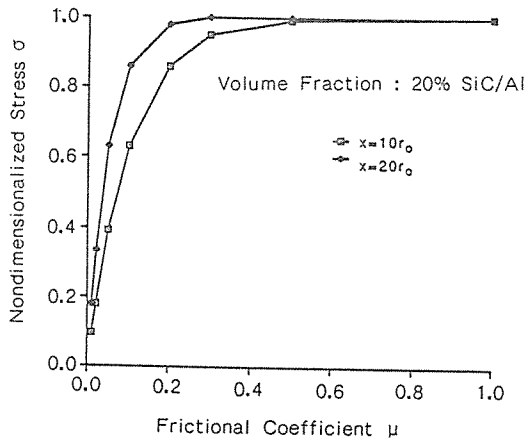


Fig. 9 Nondimensionalized stress of fibers with respect to the frictional coefficient μ .

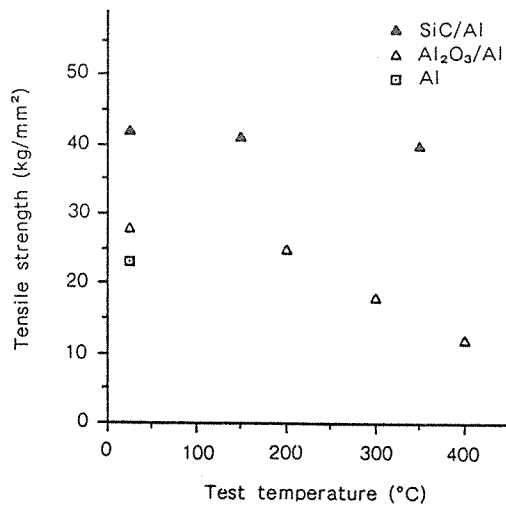


Fig. 10 Tensile strength of MMCs with respect to the temperature.

O_3/Al 복합재료와 비교하였다. 위와 같은 과정에서 얻은 결론을 요약하면,

1. Single Boron 보강섬유 복합재료의 계면결합력 관찰로 얻은 최적 제조공정 Map은 다발의 B/ Al 복합재료의 제조에 연장 응용이 가능하였고, SiC/ Al 제조시에는 Kelvin 식을 근거로 하여 가압력을 증가하면 양호한 SiC/ Al 제조시편을 얻었다.

2. Squeeze Casting에 의한 금속 복합재료는 제조공정 인자들의 상호 유기적인 관계로 체계적이고 종합적인 관찰에 의한 제조공정 최적화가 필연적이며, 제조될 복합재료의 구성 보강섬유 및 기지재료의 종류에 따라 최적 공정조건이 달라진다.

3. Squeeze Casting에 의해 제조된 장섬유 SiC/ Al 금속 복합재료는 기지재료에 비하여 인장강도가 200% 정도 높으며, 고온($400^{\circ}C$)까지 큰 강도저하가 없었다.

후 기

본 연구는 과학기술처 특정연구 과제로 수행된 사업의 일환으로 이루어진 것으로 연구비를 지원해 주신 과학기술처에 감사드립니다.

참고문헌

1. Girot F.A., L. Albingre, Quenisset J.M., and Naslain R., "Rheocasting Al Matrix Composites", J. of Metals, Nov. 1987, Vol. 39, pp.18
2. Chou T.W., Kelly A., and Okura A., "Fiber Reinforced Metal-Matrix Composites", Composites, Vol. 16, No. 3, July 1985.
3. Delanny F., Froyen L., and Derutter A., "Review the Wetting of Solids by Molten Metals and its Relation to the Preparation of Metal Matrix Composites", J. of Material Science, Vol. 22, 1987, pp.1
4. Rohatgi P.K., Asthana R., and Das S., "Solidification, Structures, and Properties of Cast Metal-Ceramic Particle Composites", Int. Metals Reviews, 1986, Vol. 31, pp.115
5. Verma S.K., and Dorcic J.L., "Squeezing Production Costs from Metal-Ceramic Composites", Advanced Materials & Processes. 1988, Vol. 5, pp.49
6. Okada S., Fujii N, Goto A., and Morimoto S., "Development of Fully Automatic Squeeze Casting Machine", AFS Trans. 82-16, pp.135
7. Clyne T.W., and Mason J.F., "The Sque-

eze Infiltration Process for Fabrication of Metal-Matrix Composites", Met. Trans. Vol. 18A, Aug. 1987, pp.15-19

8. 이상관, 이길근, 김 진, "금속 복합재료의 제조 공정과 특성", 복합재료 학술발표 논문초록집, 1988, 11, pp.97

9. Mortensen A., Michaud V.J., Cornie J.A., and Flemings M.C., "Kinetics of Fiber Preform Infiltration", in Cast Reinforced Metal Composites, pp.7, 1988 Sep.

10. Verma S.K., and Dorcic J.L., "Performance Characteristics of Metal-Ceramic Composites Made by the Squeeze Casting Process", Ceram. Eng. Sci. Proc., Vol. 9, 1988, pp.579

11. Folgar F., "Fiber FP/Metal Matrix

Composite Connecting Rods", Ceram. Eng. Sci. Proc., Vol. 9, 1988, pp.561

12. Kim Jin, Lee Sang-Kwan and Jun Eui-Jin, "The Bonding Strength at the Fiber/Matrix Interface of Metal Matrix Composites", ASTM Symposium, 1988. Nov.

13. 이준석, "3 차원 브레이드 복합재료의 기하학적 구조가 역학적 성질에 미치는 영향", 석사논문, 서울대 섬유공학과, 1989. 1.

14. Piggott M.R., "Load-Bearing Fibre Composites", Pergammon Press, 1980, pp.89

15. Amirbayat J., and Hearle J. W.S., "Properties of Unit Composites as Determined by the Properties of the Interface", Fibre Science and Technology, Vol. 2, 1969, pp.123